



На правах рукописи

Саверкин Олег Владимирович

**АЛГОРИТМЫ ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ РЛС
В СВЯЗАННЫХ КООРДИНАТАХ**

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникации» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

- Научный руководитель:** Васильев Константин Константинович
доктор технических наук, профессор кафедры
«Телекоммуникации» ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный технический университет».
- Официальные оппоненты:** Пятков Вячеслав Викторович, доктор технических наук,
начальник научно-технического комплекса
АО «НИИ телевидения» (г. Санкт-Петербург);
Бундин Герман Георгиевич, доктор технических наук,
старший научный сотрудник отдела аспирантуры
АО «НПП Радар ммс» (г. Санкт-Петербург).
- Ведущая организация:** Ульяновский филиал Федерального бюджетного
учреждения науки Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук
(УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) (г. Ульяновск).

Защита состоится 16.12.2020 в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д.212.238.03 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан 14 октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.238.03
к.т.н., доцент



Шевченко М.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Траекторная обработка радиолокационной информации (РЛИ) представляет интерес для широкого круга исследователей. Большое число работ Российских (Бакут П.А., Кузьмин, С.З., Кутузов В.М., Сосулин Ю.Г. и др.) и зарубежных (BarShalom Y., Rong Li X., Sage A.P., Farina A. и др.) ученых посвящены исследованию различных подходов к описанию изменения во времени траекторных параметров движущейся цели и алгоритмов траекторной обработки сигналов.

Были разработаны различные модели движения: от сложных, учитывающих всю доступную информацию о движении объекта, до упрощенных для отдельного описания прямолинейного движения и маневрирования. На основе существующих моделей синтезированы разнообразные алгоритмы траекторной фильтрации, в том числе адаптивные алгоритмы, фильтры с конечной памятью, сигматочечные фильтры, многомодельные фильтры, многие из которых базируются на калмановском оценивании. Однако в наиболее распространенной линейной стохастической модели движения параметры ускорений оказываются привязанными к базовой прямоугольной системе координат $OXYZ$. При изменении направления движения любых воздушных целей изменяются и возможные допустимые среднеквадратичные отклонения (СКО) по этим координатам, что не соотносится с искусственно введенными координатами. Указанный недостаток проявляется как в трудности задания параметров ускорений вдоль координат такой модели, так и при последующей траекторной обработке, осуществляющейся с учетом параметров, привязанных к осям ускорений.

Известны различные подходы к выполнению стробирования радиолокационных отметок, где размеры стробов в пространстве определяются на основе информации об ошибках нового измерения и экстраполяции координат, а также различных допущений о маневренных возможностях сопровождаемой цели. При этом строб имеет, как правило, форму эллипсоида или параллелепипеда.

Вместе с тем, существующим методам представления траекторий и алгоритмам траекторной обработки свойственны некоторые недостатки. К примеру, различные допущения и приближения при описании движения сопровождаемого объекта приводят к снижению диапазона скоростей, для которого оценки фильтров будут эффективными. Возможное решение, основанное на применении двух и более моделей движения, усложняет процесс фильтрации. Существующие способы фильтрации траекторных параметров, как правило, являются компромиссом между сложностью и точностью оценивания параметров движения. Кроме того, большинство предложенных решений разработаны под конкретные условия применения, при изменении которых характеристики фильтров ухудшаются. Ряд алгоритмов зависит от характеристик «лучшего» фильтра, а при разработке адаптивных рекурсивных фильтров зачастую возникают серьезные проблемы, связанные с устойчивостью. Для некоторых алгоритмов точность прогнозирования определяется размером доступной предыстории о параметрах движения цели, но при этом возрастают как время включения фильтра в работу, так и требования к объему хранимых данных. В свою очередь, неправильный выбор формы строба, как и искусственное завышение его размеров ради снижения вероятности пропусков отметок от цели приводят к попаданию в строб ложных отметок или отметок, принадлежащих другим целям.

Таким образом, имеется актуальная задача улучшения алгоритмов траекторной фильтрации и контроля наличия цели в стробах сопровождения.

Цели и задачи. Целью работы является повышение эффективности траекторной обработки РЛИ современных и перспективных трехкоординатных обзорных радиолокационных станций (РЛС) на основе динамических моделей в координатах, связанных с движением цели.

Для достижения заявленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ известных и разработка новых моделей описания изменения во времени траекторных параметров цели в связанной с ее движением системе координат.

2. Синтез алгоритмов траекторной фильтрации при описании движения цели в связанных координатах.

3. Разработка алгоритмов стробирования радиолокационных отметок от цели с формированием строга в связанных координатах в форме усеченного эллипсоидного сектора.

4. Создание программного комплекса (ПК) для компьютерного моделирования процессов движения цели, отображения траекторий на основе радиолокационных наблюдений, сопровождения цели, вычисления основных показателей сравнительной эффективности.

5. Проведение сравнительного анализа эффективности разработанных и известных алгоритмов траекторного сопровождения целей, в том числе быстро маневрирующих, при наблюдениях в декартовых и сферических координатах.

Объектом исследования в диссертационной работе являются РЛС обнаружения и сопровождения целей.

Предмет исследования – модели движения в связанной системе координат, алгоритмы траекторной фильтрации и стробирования.

Методы исследования основаны на теории вероятностей, статистической теории радиолокации, методах математического моделирования и вычислительного эксперимента. При этом используются средства современной информатики и вычислительной техники, включая среду моделирования MATLAB, язык программирования C++ и среду разработки Qt Creator.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Впервые предложены и исследованы модели движения в связанных координатах.

2. Впервые синтезированы и исследованы алгоритмы траекторной фильтрации, базирующиеся на моделях движения в связанных координатах и обеспечивающие снижение погрешностей фильтрации параметров движения, в том числе при сопровождении быстро маневрирующих целей.

3. Впервые предложен и исследован алгоритм стробирования с формированием строга в связанных координатах, применение которого позволяет повысить среднее время сопровождения цели по сравнению с известным алгоритмом с формированием строга в форме эллипсоида.

4. Разработан программный комплекс для исследования эффективности предложенных алгоритмов траекторной фильтрации и стробирования.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением современного математического аппарата с учетом влияющих факторов и заданных ограничений. Достоверность научных положений и выводов базируется также на непротиворечивости применяемых моделей и методов, а также близости теоретических и экспериментальных результатов исследований.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке и исследовании моделей движения в связанных координатах, сочетающих простоту математического представления и позволяющих адекватно описывать реальные физические явления, на основе которых созданы алгоритмы траекторной фильтрации и стробирования радиолокационных отметок, учитывающие характеристики движения и маневры целей и обеспечивающие эффективные оценки траекторных параметров в широком диапазоне скоростей с использованием одного фильтра в составе алгоритма траекторной обработки РЛИ.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в том, что предложены и исследованы конкретные алгоритмы траекторной фильтрации и стробирования, основанные на моделях движения в связанных координатах, которые могут быть использованы разработчиками для повышения эффективности существующих и перспективных систем траекторной обработки РЛИ. Практическая ценность подтверждается актом внедрения результатов диссертационного исследования в производственную деятельность ФНПЦ АО «НПО «Марс».

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Лучшее сходство с реальными траекториями движения маневрирующих воздушных целей обеспечивают математические модели движения, основные параметры которых определяются типом цели и не связаны с направлениями осей координат, используемых при сопровождении.

2. При незначительном росте вычислительных затрат алгоритмы траекторной фильтрации, основанные на моделях движения в связанных координатах, обеспечивают снижение приблизительно на 40% СКО оценивания координат и на 95% СКО оценивания скорости, при сопровождении цели как в декартовых, так и в сферических координатах.

3. Алгоритм стробирования радиолокационных отметок от цели с формированием строба в связанных координатах в форме усеченного эллипсоидного сектора обеспечивает до 30% более продолжительное, чем при эллиптическом стробировании, сопровождение маневрирующих целей.

4. ПК позволяет моделировать различные траектории движения целей с использованием нескольких моделей движения, имитировать наблюдения РЛС в прямоугольных и сферических координатах с заданной погрешностью измерений, выполнять траекторную фильтрацию и отображать статистические характеристики исследуемых случайных величин, выполнять построение стробов в форме эллипса и усеченного сектора с последующей оценкой положения очередной отметки от цели относительно границ полученных стробов.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на Международных конференциях «International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, REIT 2017, REIT 2018» (Екатеринбург, 2017, 2018), «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA» (Москва, 2019) и всероссийских конференциях: «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2015), «Интеллектуальные разработки в интересах строительства ВМФ» (Петродворец, 2015), «Интегрированные системы управления» (Ульяновск, 2016), «Автоматизация процессов управления» (Ульяновск, 2018), «Минцевские чтения» (Москва, 2016), 73-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио (Санкт-Петербург, 2018), «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем» (Ульяновск, 2019), «Современные технологии обработки сигналов» (Москва, 2019).

Публикация результатов работы. По теме диссертации автором опубликовано 27 работ, в том числе 3 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании, индексируемом в Scopus, 1 глава в коллективной монографии, проиндексированной в Web of Science, 19 работ в журналах, трудах и материалах международных и Всероссийских конференций и семинаров. Получены 2 патента на изобретения и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные практические исследования выполнены автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Основная часть работы изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 68 рисунков, 2 таблицы, список литературы содержит 136 наименований, в том числе 27 работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор существующих моделей движения, в том числе известной линейной стохастической модели и различных её вариаций, модели Зингера и модели рывков, а также модели с применением функций сглаживающего сплайна, и моделей радиолокационных наблюдений. В главе рассмотрены известные алгоритмы траекторной фильтрации, среди которых адаптивные фильтры и фильтры с конечной памятью, многомодельные алгоритмы, сигматочечные фильтры и фильтр частиц, и алгоритмы

стробирования с построением строба в форме эллипсоида и параллелепипеда. Проанализированы достоинства и выявлены недостатки существующих решений, а также сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрен частный случай уравнений состояния для известной линейной стохастической модели:

$$\begin{aligned}x_i &= x_{(i-1)} + v_{x(i-1)}T_i, \\y_i &= y_{(i-1)} + v_{y(i-1)}T_i, \\z_i &= z_{(i-1)} + v_{z(i-1)}T_i, \\v_{xi} &= v_{x(i-1)} + a_x T_i \xi_{xi}, \\v_{yi} &= v_{y(i-1)} + a_y T_i \xi_{yi}, \\v_{zi} &= v_{z(i-1)} + a_z T_i \xi_{zi},\end{aligned} \quad i=1,2,\dots,k.$$

где x_i, y_i, z_i – декартовы координаты положения объекта; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – проекции скорости на координатные оси; $\xi_{xi}, \xi_{yi}, \xi_{zi}$ – гауссовские случайные величины с ковариационными матрицами $V_{\xi_i} = M \{ \bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T \}$; T_i – интервал времени между соседними отсчетами; a_x, a_y, a_z – СКО соответствующих ускорений.

Известным алгоритмом траекторной фильтрации, основанным на такой модели, является линейный векторный шестимерный фильтр Калмана (ФК) (рисунок 1).

В указанном алгоритме, который будем обозначать АФ1, расчет оценок выполняется по известной формуле:

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{\mathcal{O}_i} + B_i (\bar{z}_i - C \hat{x}_{\mathcal{O}_i}), \quad (1)$$

где $\hat{x}_{\mathcal{O}_i}$ – вектор экстраполированных параметров траектории, который определяется как $\hat{x}_{\mathcal{O}_i} = \mathcal{O}_i \hat{x}_{i-1}$; B_i – матричный коэффициент усиления, который рассчитывается по формуле $B_i = P_i C^T V_{ni}^{-1}$,

где $P_i = P_{\mathcal{O}_i} (E + C^T V_{ni}^{-1} C P_{\mathcal{O}_i})^{-1}$ – ковариационная матрица ошибок оценивания; $P_{\mathcal{O}_i} = \mathcal{O}_i P_{(i-1)} \mathcal{O}_i^T + \mathcal{G}_i V_{\xi_i} \mathcal{G}_i^T$ – ковариационная матрица ошибок прогнозирования; V_{ni} – корреляционная матрица ошибок измерения координат; $C, \mathcal{O}_i, \mathcal{G}_i$ – соответствующие связующие матрицы.

В главе предложены два подхода к описанию процесса изменения траекторных параметров сопровождаемой цели в скоростной, связанной с направлением движения цели системе координат (рисунок 2), один из которых состоит в прямом введении скорости и углов в связанных с движением цели координатах в вектор состояния:

$$\begin{aligned}x_i &= x_{(i-1)} + T_i V_{i-1} \cos \phi_{i-1} \cos K_{i-1}, \\y_i &= y_{(i-1)} + T_i V_{i-1} \cos \phi_{i-1} \sin K_{i-1}, \\z_i &= z_{(i-1)} + T_i V_{i-1} \sin \phi_{i-1}, \\V_i &= V_{i-1} + a T_i \xi_{vi}, \\K_i &= K_{i-1} + v_K T_i \xi_{Ki}, \\\phi_i &= \phi_{i-1} + v_\phi T_i \xi_{\phi i}.\end{aligned}$$

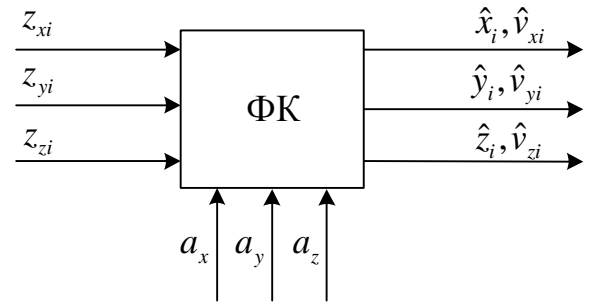


Рисунок 1 – Схема алгоритма при неразделимой фильтрации по координатам

где x_i, y_i, z_i – декартовы координаты положения объекта; V_i – путевая скорость; K_i – курс; ϕ_i – угол наклона траектории; a – СКО ускорения; v_K – СКО скорости изменения курса; v_ϕ – СКО скорости возможного изменения угла наклона траектории рассматриваемого класса целей; $\xi_{vi}, \xi_{Ki}, \xi_{\phi i}$ – гауссовские независимые СВ с ковариационными матрицами $V_{\xi_i} = M \{ \bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T \}$; T_i – интервал времени между соседними отсчетами.

Второй подход заключается в квазилинеаризации уравнений для проекций новых координат на оси декартовой системы:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{(i-1)} + v_{x(i-1)} T_i, \\ y_i &= y_{(i-1)} + v_{y(i-1)} T_i, \\ z_i &= z_{(i-1)} + v_{z(i-1)} T_i, \\ \bar{v}_{xi} &= \bar{v}_{x(i-1)} + I_{xK} (\bar{v}_{x(i-1)}) \bar{\xi}_{Ki}, \end{aligned}$$

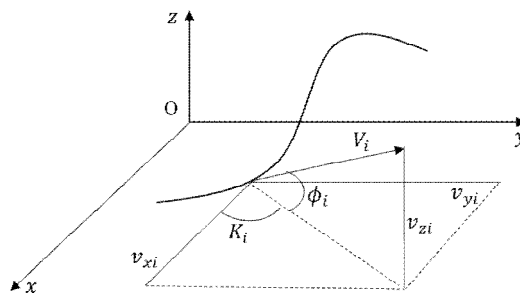


Рисунок 2 – Задание скорости в связанной системе координат

где $\bar{v}_{xi} = (v_{xi} \quad v_{yi} \quad v_{zi})^T$; $\bar{\xi}_{Ki} = (aT_i \xi_{vi} \quad v_K T_i \xi_{Ki} \quad v_\phi T_i \xi_{\phi i})^T$;

$$V_{i-1} = |\bar{v}_{x(i-1)}| = \sqrt{v_{x(i-1)}^2 + v_{y(i-1)}^2 + v_{z(i-1)}^2}; v_{ni(i-1)} = \sqrt{v_{x(i-1)}^2 + v_{y(i-1)}^2}; I_{xK} (\bar{v}_{x(i-1)}) = \frac{d\bar{v}_{x(i-1)}}{dV_{i-1}};$$

$$\cos K_{i-1} = v_{x(i-1)} / v_{ni(i-1)}; \cos \phi_{i-1} = v_{ni(i-1)} / V_{i-1}.$$

На рисунке 3 представлены характерные реализации траекторий, полученные с использованием первого подхода при двух значениях параметров $a=0$ м/с, $v_k=1$ град/с (рисунок 3а) и $a=1$ м/с, $v_k=3$ град/с (рисунок 3б).

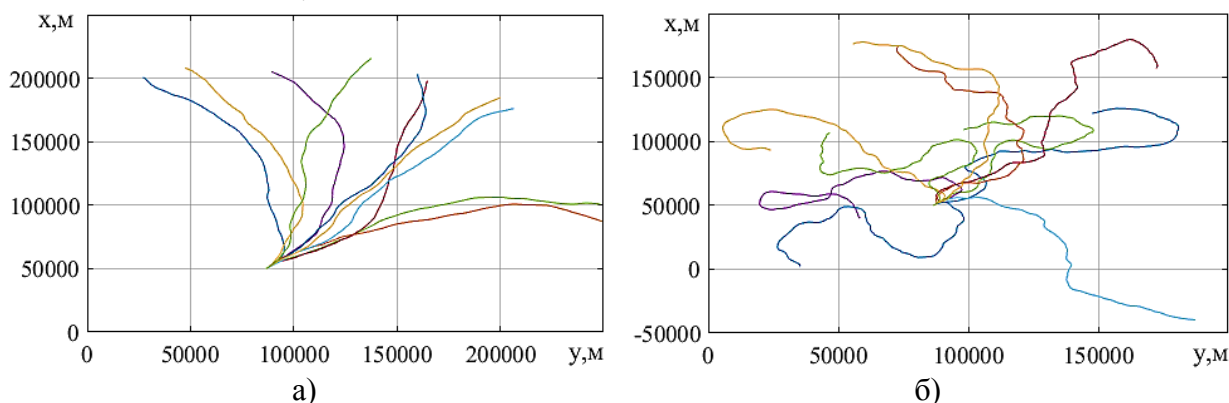


Рисунок 3 – Характерные траектории движения целей на плоскости

Обе модели включают в качестве основных параметров линейное ускорение цели и скорости изменения курса и угла наклона траектории, которые определяются типом цели и не связаны с направлениями осей координат, используемых при сопровождении. Однако предложенная во втором подходе модель, в отличие от первого, является приближенной.

На основе предложенных моделей синтезированы алгоритмы траекторной фильтрации: один алгоритм для первого подхода (АФ2) при коррелированных наблюдениях и два для второго – при коррелированных (АФ3) и независимых (АФ4) наблюдениях соответственно. Во всех алгоритмах расчет оценок выполняется согласно известным выражениям ФК (1).

При этом для АФ2 изменился состав вектора состояния и выражение для расчета ковариационной матрицы ошибок прогнозирования, которое имеет вид:

$$P_{zi} = \varphi_i'(\hat{\bar{x}}_{i-1}) P_{(i-1)} \varphi_i'^T(\hat{\bar{x}}_{i-1}) + \mathcal{G}_i V_{\xi i} \mathcal{G}_i^T,$$

где векторная функция $\varphi_i'(\bar{x}_{i-1})$ определяется как $\varphi_i'(\bar{x}_{i-1}) = \frac{d\varphi_i(\bar{x}_{i-1})}{d\bar{x}_{i-1}}$.

Полученный фильтр позволяет лучше учитывать нелинейный характер движения объекта, однако в схему фильтра дополнительно включены два преобразователя координат и устройство задержки на такт (рисунок 4), что приводит к некоторому росту вычислительных затрат.

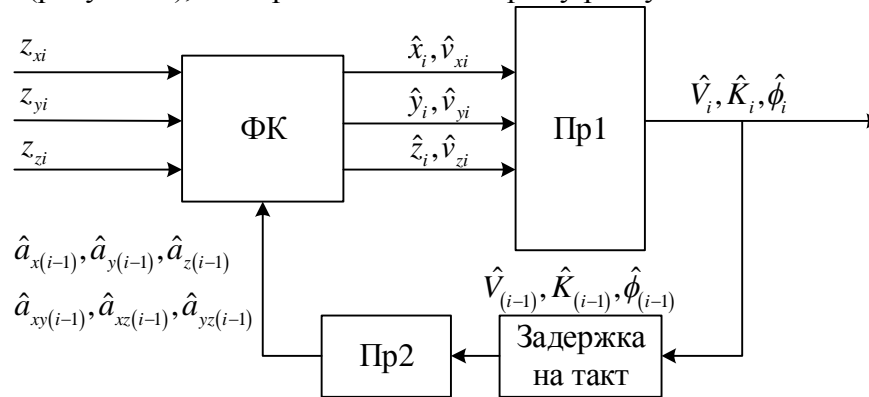


Рисунок 4 – Схема алгоритма, основанного на связанной модели, при неразделимой фильтрации по координатам

Для АФ3 и АФ4 выражение для расчета ковариационной матрицы ошибок прогнозирования запишется следующим образом:

$$P_{zi} = \mathcal{G}_i P_{(i-1)} \mathcal{G}_i^T + \mathcal{G}_i(\hat{\bar{x}}_{i-1}) V_{\xi i} \mathcal{G}_i^T(\hat{\bar{x}}_{i-1})$$

с учетом нелинейной зависимости матрицы возмущений $\mathcal{G}_i(\hat{\bar{x}}_{i-1})$ от вектора состояния. Здесь ковариационная матрица порождающего процесса $I_{xK}(\hat{v}_{x(i-1)}) \mathcal{G}_{Vi} \mathcal{G}_{Vi}^T I_{xK}^T(\hat{v}_{x(i-1)})$ содержит ненулевые диагональные элементы. Для АФ3 ненулевыми будут и остальные элементы матрицы, отражающие корреляционные связи компонент преобразованного порождающего процесса. Схема такого фильтра также соответствует рисунку 4.

Для снижения вычислительных затрат в АФ4 предлагается использовать отдельную по координатам фильтрацию (рисунок 5). Такое решение становится возможным за счет обнуления внедиагональных элементов ковариационной матрицы $\mathcal{G}_i(\hat{\bar{x}}_{i-1}) V_{\xi i} \mathcal{G}_i^T(\hat{\bar{x}}_{i-1})$.

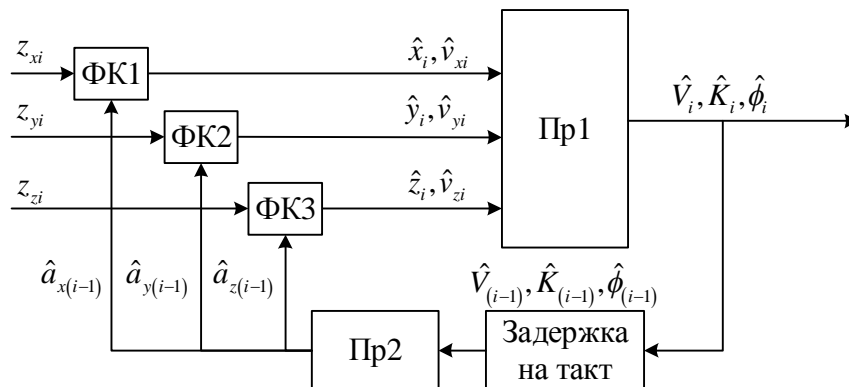


Рисунок 5 – Схема алгоритма, основанного на связанной модели, при отдельной фильтрации по координатам

Рассчитанные оценки параметров ускорения

$$\begin{aligned}\hat{a}_{xi} &= \sqrt{\left(\frac{\hat{v}_{x(i-1)}}{\hat{V}_{(i-1)}}\right)^2 a^2 + \hat{v}_{y(i-1)}^2 v_K^2 + \hat{v}_{z(i-1)}^2 v_\phi^2 \cos^2 \hat{K}_{(i-1)}} = \\ &= \sqrt{a^2 \cos^2 \hat{K}_{(i-1)} \cos^2 \hat{\phi}_{(i-1)} + v_K^2 \hat{V}_{(i-1)}^2 \sin^2 \hat{K}_{(i-1)} \cos^2 \hat{\phi}_{(i-1)} + v_\phi^2 \hat{V}_{(i-1)}^2 \cos^2 \hat{K}_{(i-1)} \sin^2 \hat{\phi}_{(i-1)}}, \\ \hat{a}_{yi} &= \sqrt{\left(\frac{\hat{v}_{y(i-1)}}{\hat{V}_{(i-1)}}\right)^2 a^2 + \hat{v}_{x(i-1)}^2 v_K^2 + \hat{v}_{z(i-1)}^2 v_\phi^2 \sin^2 \hat{K}_{(i-1)}} = \\ &= \sqrt{a^2 \sin^2 \hat{K}_{(i-1)} \cos^2 \hat{\phi}_{(i-1)} + v_K^2 \hat{V}_{(i-1)}^2 \cos^2 \hat{K}_{(i-1)} \cos^2 \hat{\phi}_{(i-1)} + v_\phi^2 \hat{V}_{(i-1)}^2 \sin^2 \hat{K}_{(i-1)} \sin^2 \hat{\phi}_{(i-1)}}, \\ \hat{a}_{zi} &= \sqrt{\left(\frac{\hat{v}_{z(i-1)}}{\hat{V}_{(i-1)}}\right)^2 a^2 + \hat{v}_{nl(i-1)}^2 v_\phi^2} = \sqrt{a^2 \sin^2 \hat{\phi}_{(i-1)} + v_\phi^2 \hat{V}_{(i-1)}^2 \cos^2 \hat{\phi}_{(i-1)}},\end{aligned}$$

полученные с помощью преобразования из связанной системы координат, позволяют учитывать направление движения целей и связанные с этим направлением различные возможности по выполнению маневров по различным декартовым координатам при получении следующей оценки траекторных параметров сопровождаемой цели. При отсутствии наблюдений компонент скорости цели в алгоритме АФ4 не требуется операции обращения матрицы, для выполнения которой необходимо в среднем $O(N^N)$ операций умножения, где N – число наблюдаемых параметров. Следовательно, АФ4 сочетает в себе простоту линейной фильтрации с отдельным оцениванием и достоинства фильтрации в связанных координатах.

Эффективность предложенных алгоритмов подтверждается результатами проведенного математического моделирования. Для выполнения сравнительной оценки исследуемых алгоритмов рассчитывались усредненные значения корня из среднего квадрата ошибки оценивания координаты x ($\hat{\sigma}_x, \text{м}$) и корня из среднего квадрата ошибки оценивания скорости движения сопровождаемого объекта ($\hat{\sigma}_v, \text{м/с}$). Усреднение производилось по 2000 реализациям.

В ходе моделирования имитировалось сопровождение цели в декартовых координатах. Движение цели задавалось с различной начальной скоростью при различном уровне помех. Все алгоритмы были настроены на сопровождение цели, движущейся со средней скоростью 300 м/с, нулевым ускорением и скоростью изменения курса 1 град/с. По полученным результатам установлено, что некоторые предложенные алгоритмы обеспечивают наибольший выигрыш относительно известного ФК при движении цели с параметрами отличными от настроек фильтра.

На рисунке 6а представлены результаты при движении с начальной скоростью 30 м/с. СКО наблюдений по координатам 100 м. При таких начальных условиях наиболее точный результат демонстрирует АФ2 – выигрыш в точности относительно АФ1 более 40%. АФ4 имеет выигрыш около 30%, АФ3 – около 20%. При оценке скорости (рисунок 7а) наилучший результат также имеет АФ2, при этом многократно превосходит в точности АФ1 (до 10 раз точнее). АФ3 и АФ4 имеют близкую точность. Выигрыш по отношению к АФ1 составляет порядка 80%.

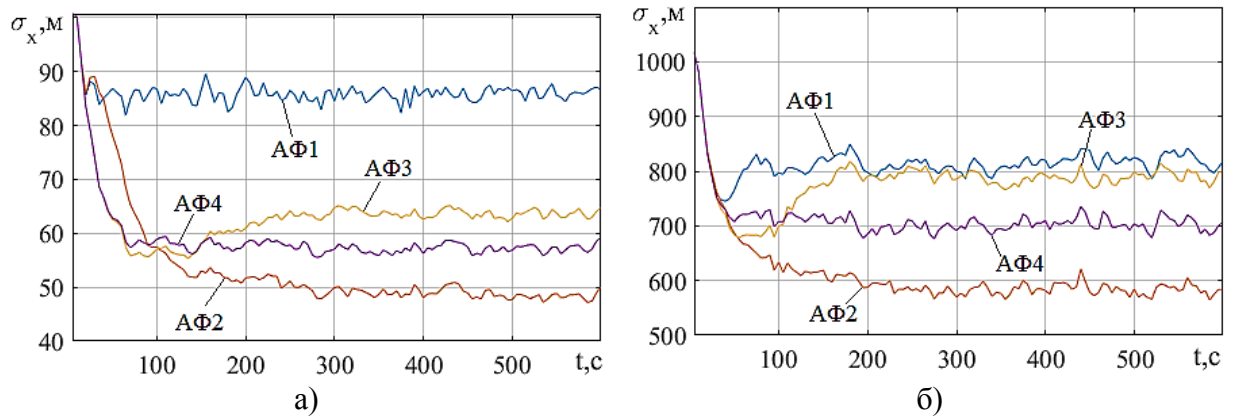


Рисунок 6 – Погрешности оценивания координаты

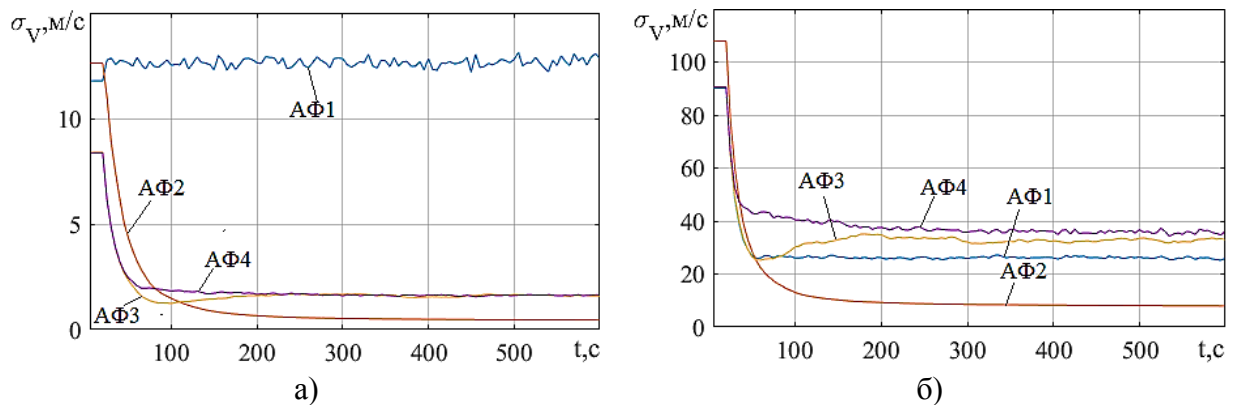


Рисунок 7 – Погрешности оценивания скорости

На рисунке 6б представлены результаты при движении с начальной скоростью 900 м/с и СКО наблюдений 1000 м. В этом случае АФ2 также имеет наилучшую точность оценивания координат – полученные оценки до 25% точнее АФ1 и до 15% точнее АФ4. В свою очередь, АФ4 на 15% точнее, чем АФ1 и АФ3, которые имеют близкую точность оценивания. При оценке скорости (рисунок 7б) АФ2 также имеет наибольшую точность оценивания и выигрывает в точности у АФ1 около 60%. АФ3 и АФ4 уступают АФ1 в точности оценивания скорости.

Таким образом, АФ2 и АФ4 обеспечивают лучшую точность сопровождения в большем диапазоне скоростей, чем АФ1, однако для высокоскоростных целей АФ4 имеет большую погрешность оценивания скорости. АФ3 обеспечивает выигрыш только при сопровождении низкоскоростных целей. Также стоит отметить, что наиболее простым из предложенных алгоритмов является АФ4, который не требует длительной настройки и тщательной отладки, связанной с нелинейностью модели, как АФ2. АФ3 также нуждается в более внимательной настройке из-за наличия внедиагональных элементов матрицы порождающего процесса.

Отдельно остановимся на сопровождении быстро маневрирующих целей, например, движущихся с быстрым ускорением или резким изменением курса. На рисунке 8 представлены характерные реализации, полученные для целей, движущихся с сильным маневрированием по курсу при малой скорости ($V=100$ м/с, $a=0$ м/с², $v_K=20$ град/с) (рисунок 8а) и ускорением и маневрированием на высокой скорости ($V=900$ м/с, $a=5$ м/с², $v_K=3$ град/с) (рисунок 8б).

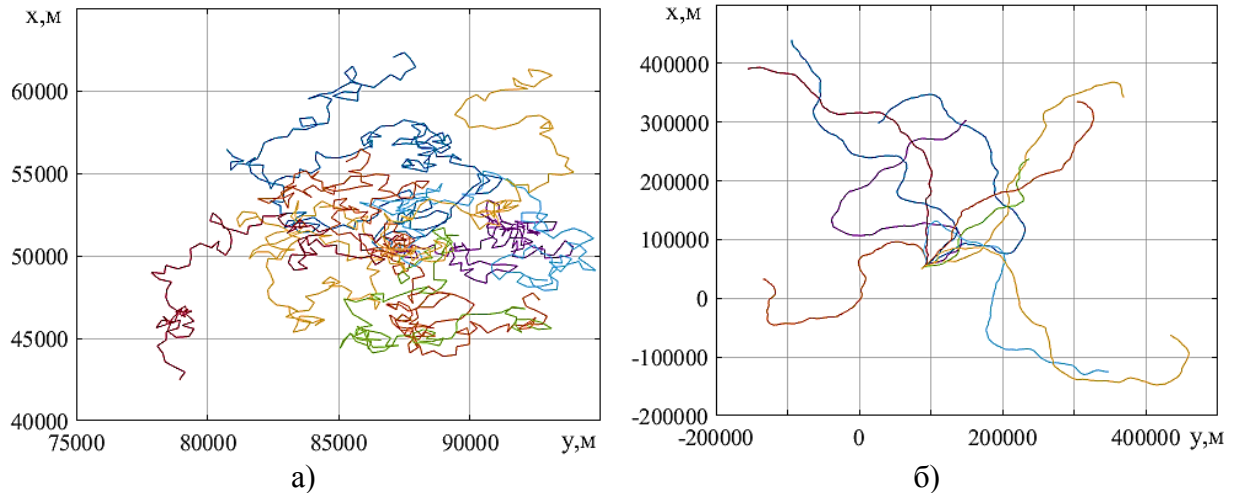


Рисунок 8 – Характерные траектории движения быстро маневрирующих целей на плоскости
 Для сопровождения быстро маневрирующих целей экспериментально были подобраны следующие настройки фильтров: средняя скорость сопровождаемой цели $V=300$ м/с, ускорение $a=5$ м/с², скорость изменения курса $v_K=5$ град/с. При моделировании в условиях сильного шума (СКО наблюдений координат 1000 м) получены следующие результаты.

На рисунке 9 представлены погрешности оценивания координаты и скорости для целей, движущихся с сильным маневрированием по курсу при малой скорости ($V=100$ м/с, $a=0$ м/с², $v_K=20$ град/с). Хорошо видно, что фильтры в связанных координатах превосходят в точности оценивания АФ1 – выигрыш при оценивании координат для АФ2 около 15%, для АФ3 и АФ4 около 20% (рисунок 9а). Однако АФ2 уступает АФ1 в точности оценивания скорости, при этом АФ3 и АФ4 имеют близкие значения погрешности и выигрывают относительно АФ1 около 10% (рисунок 9б).

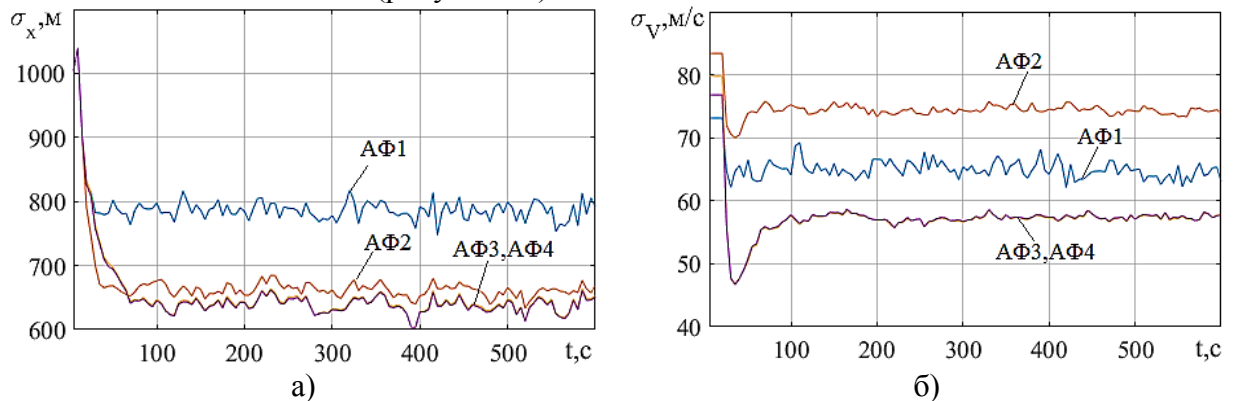


Рисунок 9 – Погрешности оценивания координаты x (а) и скорости (б)

На рисунке 10 представлены погрешности оценивания координаты и скорости для целей, движущихся с ускорением и маневрированием на высокой скорости ($V=900$ м/с, $a=5$ м/с², $v_K=3$ град/с). В этом случае выигрыш в точности оценивания координат относительно АФ1 имеет только АФ2 – величина выигрыша около 20% (рисунок 10а). АФ4 имеет точность оценивания на уровне АФ1, АФ3 уступает около 10%. При оценивании скорости (рисунок 10б) АФ3 и АФ4 проигрывают АФ1 около 25%, АФ2 выигрывает порядка 15%.

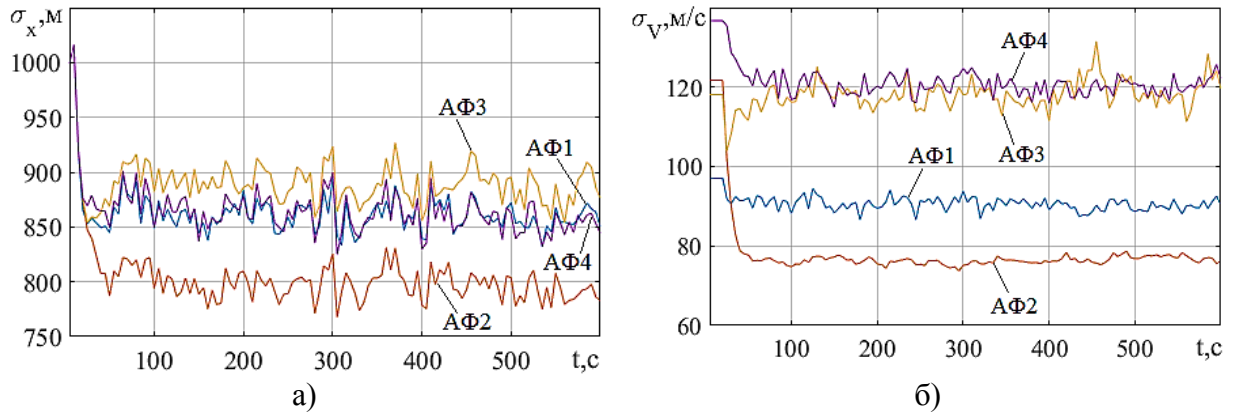


Рисунок 10 – Погрешности оценивания координаты x (а) и скорости (б)

Применение фильтрации в связанных координатах также обеспечивает возможность стробирования отметок от цели с формированием строба в форме усеченного эллипсоидного сектора, размеры которого определяются величиной соответствующих отклонений по дальности, курсу и углу наклона траектории $\delta \bar{x}_i = (\Delta D_i \quad \Delta K_i \quad \Delta \phi_i)^T$. При этом отметка с координатами считается находящейся в стробе, если выполняются все три неравенства:

$$\begin{aligned} D_{\text{э}i} - \Delta D_i &\leq D_i \leq D_{\text{э}i} + \Delta D_i, \\ K_{\text{э}i} - \Delta K_i &\leq K_i \leq K_{\text{э}i} + \Delta K_i, \\ \phi_{\text{э}i} - \Delta \phi_i &\leq \phi_i \leq \phi_{\text{э}i} + \Delta \phi_i, \end{aligned}$$

где D_i и $D_{\text{э}i}$ – наблюдение координаты дальности в связанной системе и ее экстраполированное значение; K_i и $K_{\text{э}i}$ – наблюдение курса и его экстраполированное значение; ϕ_i и $\phi_{\text{э}i}$ – угол наклона траектории и его экстраполированное значение. Для наглядности порядок построения такого строба на плоскости представлен на рисунке 11. Для определения линейных размеров строба используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \delta_{D_i} &= \Delta D_i, \\ \delta_{K_i} &= \left| \left(\hat{x}_{\text{э}i} - \hat{x}_{i-1} \right) \right| \Delta K_i, \quad i = 1, 2, \dots, \\ \delta_{\phi_i} &= \left| \left(\hat{x}_{\text{э}i} - \hat{x}_{i-1} \right) \right| \Delta \phi_i, \end{aligned}$$

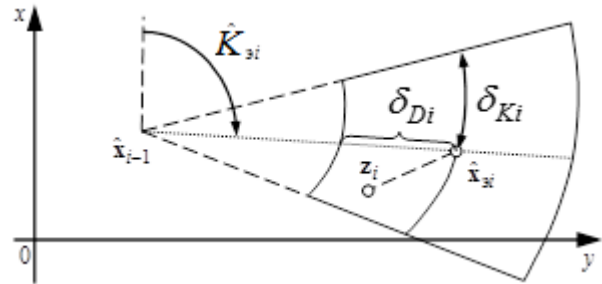


Рисунок 11 – Построение строба в связанных координатах на плоскости

где $\delta_{D_i}, \delta_{K_i}, \delta_{\phi_i}$ – линейные размеры строба по дальности, курсу и углу наклона траектории, которые также могут быть рассчитаны как $\delta_{D_i} = \gamma \sigma_{\text{св}xi}$, $\delta_{K_i} = \gamma \sigma_{\text{св}yi}$, $\delta_{\phi_i} = \gamma \sigma_{\text{св}zi}$. При этом параметр γ выбирается по заданной вероятности пропуска отметки от цели, как правило, в интервале (2-3); $\sigma_{\text{св}xi}, \sigma_{\text{св}yi}, \sigma_{\text{св}zi}$ – соответствующие отклонения на связанных осях.

Полученные форма и размеры строба определяются характером движения объекта и соответствуют области наиболее вероятного местоположения цели в пространстве в следующий момент времени наблюдения.

Эффективность предложенного алгоритма стробирования подтверждается результатами исследования, в ходе которого было зафиксировано увеличение продолжительности

сопровождения цели. На каждом этапе наблюдения выполнялось построение предложенного строба и строба в форме эллипса, имеющих равную площадь. Для полученных стробов оценивалось среднее время сопровождения цели при различных начальных условиях моделирования.

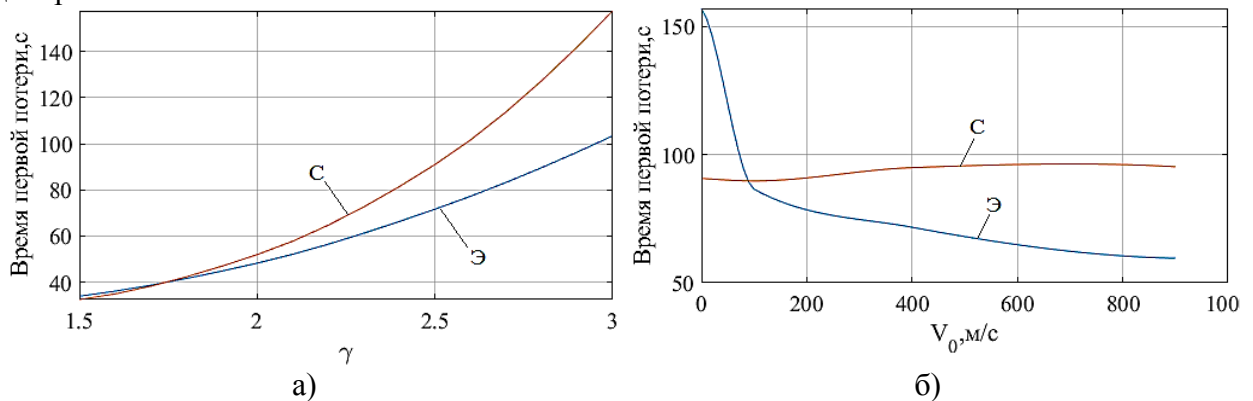


Рисунок 12 – Среднее время сопровождения

На рисунке 12а представлены зависимости при заданной вероятности пропуска отметки от цели. Видно, что при малом γ оба строба имеют близкие значения средней продолжительности сопровождения, однако с ростом коэффициента γ возрастает выигрыш секторного строба (обозначен С), величина которого превышает 30% по сравнению с эллиптическим (обозначен Э). На рисунке 12б представлены зависимости продолжительности стробирования от начальной скорости имитируемой цели, полученные при $\gamma = 2.5$. При этом средняя продолжительность сопровождения для секторного строба слабо зависит от скорости движения имитируемой цели, в то время как средняя продолжительность сопровождения для эллиптического строба снижается с ростом скорости. В результате секторный строб выигрывает до 30% у эллиптического по величине среднего времени сопровождения.

В третьей главе представлено описание программного комплекса (ПК), разработанного для исследования эффективности предложенных алгоритмов фильтрации и стробирования, а также приведены результаты сравнительного анализа эффективности предложенных алгоритмов траекторной фильтрации при имитации сопровождения цели в сферических координатах, подтверждающие эффективность предложенных решений.

Для исследования эффективности предложенных решений был разработан ПК с использованием компьютерного моделирования в среде MATLAB и языка программирования C++ с использованием среды разработки Qt Creator.

В среде MATLAB были разработаны 2 скрипта:

- «Imitator_dec.m» – для исследования эффективности траекторных фильтров и алгоритмов стробирования при имитации наблюдений в декартовых координатах;
- «Imitator.m» – для исследования эффективности траекторных фильтров при имитации сферических наблюдений.

Оба скрипта представляют собой запрограммированный алгоритм и имеют схожую структуру. При разработке программ использован модульный принцип, который обеспечивает повышение производительности и делает их наращиваемыми.

Также в среде Qt Creator была разработана программа для графического построения эллиптического и предложенного стробов на плоскости и обеспечения возможности визуальной оценки положения отметок от цели относительно границ полученных стробов. Используя встроенный инструмент системы MATLAB для преобразования готовых решений в программный код на языке C++, скрипт «Imitator_dec.m» был перенесен в программу, разработанную в среде Qt Creator. Вид графического интерфейса программы представлен на рисунке 13.

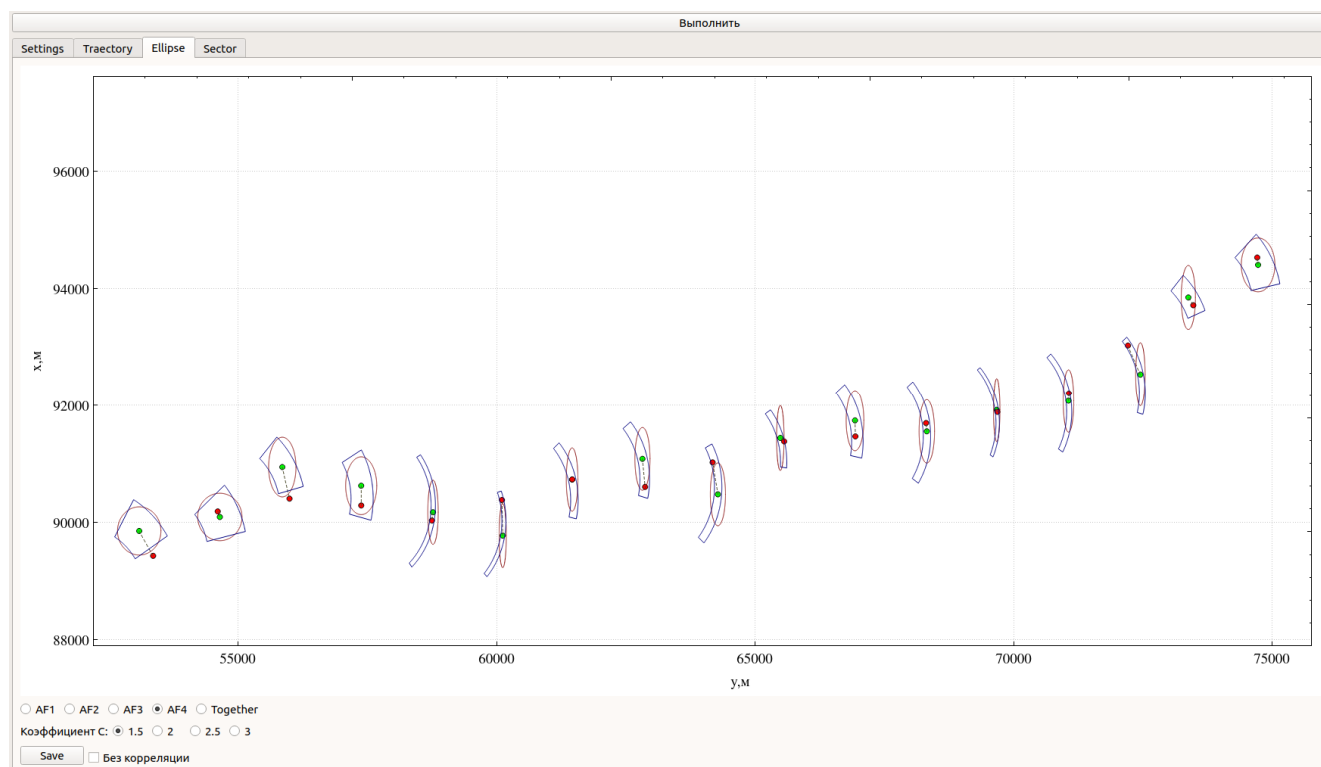


Рисунок 13 – Графический интерфейс программы для исследования стробов

При имитации сопровождения цели в сферических координатах необходимо было выполнить имитацию измерений РЛС, имеющих погрешности, близкие к реальным погрешностям современных обзорных РЛС. Из открытых источников было установлено, что современные РЛС имеют погрешности по дальности в среднем около 100 м, по пеленгу и углу места – $0,5^\circ$. Движение цели имитировалось с различной начальной скоростью и курсом на различном удалении от РЛС, расположенной в начале координат. Все алгоритмы были настроены на сопровождение цели, движущейся со средней скоростью 300 м/с, нулевым ускорением и скоростью изменения курса 1 град/с. По результатам моделирования установлено, что предложенные алгоритмы обеспечивают наибольший выигрыш относительно АФ1 при движении цели с параметрами, отличными от настроек фильтра.

На рисунке 14 представлены результаты моделирования для движения с начальной скоростью 30 м/с и курсом 45° на удалении 100 км от РЛС. При таких начальных условиях АФ2 выигрывает около 40% относительно АФ1 в точности оценивания координат (рисунок 14а), однако затрачивает больше времени на подстройку в связи с ошибками определения курса на начальном этапе (рисунок 14в). Выигрыши АФ3 и АФ4 относительно АФ1 составляют 25% и 30% соответственно.

При оценке скорости (рисунок 14б) фильтры в связанных координатах имеют близкую точность оценивания, при этом АФ2 выигрывает относительно АФ1 более 90%, АФ4 – около 85%, АФ3 – около 80%. Как и при оценке координаты, АФ2 требуется больше времени на подстройку. При оценке курса (рисунок 14в) фильтры в связанных координатах также превосходят в точности АФ1 и имеют приблизительно равную погрешность. Выигрыш относительно АФ1 достигает 55%. При этом АФ2 также затрачивает больше времени на подстройку.

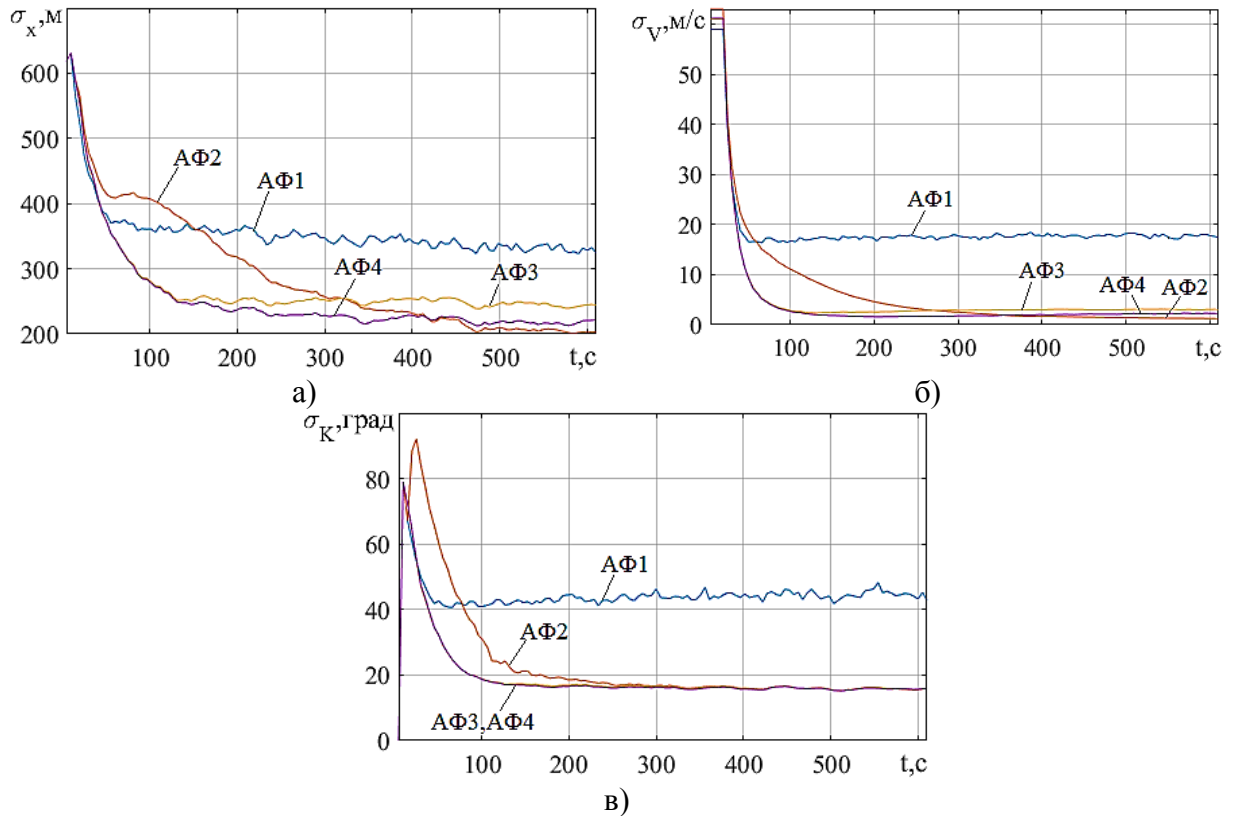


Рисунок 14 – Погрешности оценивания координаты (а), скорости (б) и курса (в)

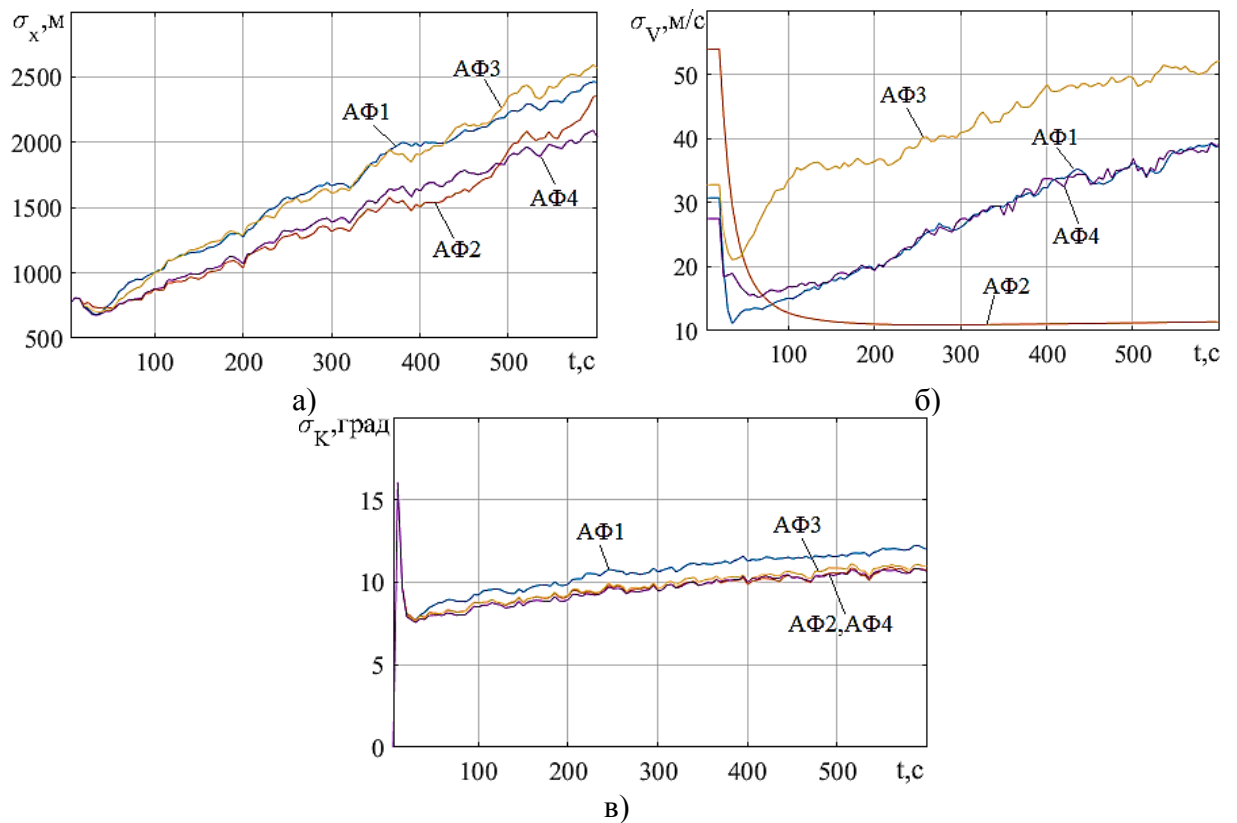


Рисунок 15 – Погрешности оценивания координаты (а), скорости (б) и курса (в)

На рисунке 15 представлены результаты моделирования для движения с начальной скоростью 900 м/с и курсом 45° на удалении 100 км от РЛС. Наилучший результат обеспечивают АФ2 и АФ4 – выигрыш относительно АФ1 достигает 25% (рисунок 15а). При этом на небольших дальностях АФ2 превосходит в точности АФ4, однако с удалением

цели точность АФ2 снижается и уже АФ4 превосходит АФ2. АФ3 имеет точность на уровне АФ1.

При оценке скорости (рисунок 15б) с удалением цели погрешности для всех алгоритмов, кроме АФ2, возрастают. Таким образом, выигрыш АФ2 относительно АФ1 растет и достигает 75%. АФ4 имеет точность на уровне АФ1, АФ3 проигрывает АФ1 около 20%.

При оценке курса (рисунок 15в) алгоритмы в связанных координатах имеют близкую точность оценивания и выигрывают относительно АФ1 около 10%, при этом оценки АФ2 и АФ4 несколько точнее АФ3.

Таким образом, в сферических координатах наилучшим решением представляется применение АФ4, поскольку АФ2 уступает ему в точности на больших удалениях, а при сопровождении целей с параметрами, отличающимися от настроек фильтров, АФ4 имеет выигрыш на уровне АФ2 и АФ3 или больше (особенно для высокоскоростных целей). Кроме того, учитывая многообразие вариантов движения цели относительно места расположения РЛС, одним из вариантов повышения точности сопровождения представляется применение нескольких фильтров в составе алгоритма, а при отдельном оценивании потребуется меньше вычислительных ресурсов системы траекторной обработки.

Как и в главе 2, при имитации наблюдений в сферических координатах также проводилось моделирование сопровождения быстро маневрирующих целей. При этом использовались те же настройки фильтров: средняя скорость сопровождаемой цели $V=300\text{ м/с}$, ускорение $a=5\text{ м/с}^2$, скорость изменения курса $v_k=5\text{ град/с}$. Ниже показаны некоторые полученные результаты.

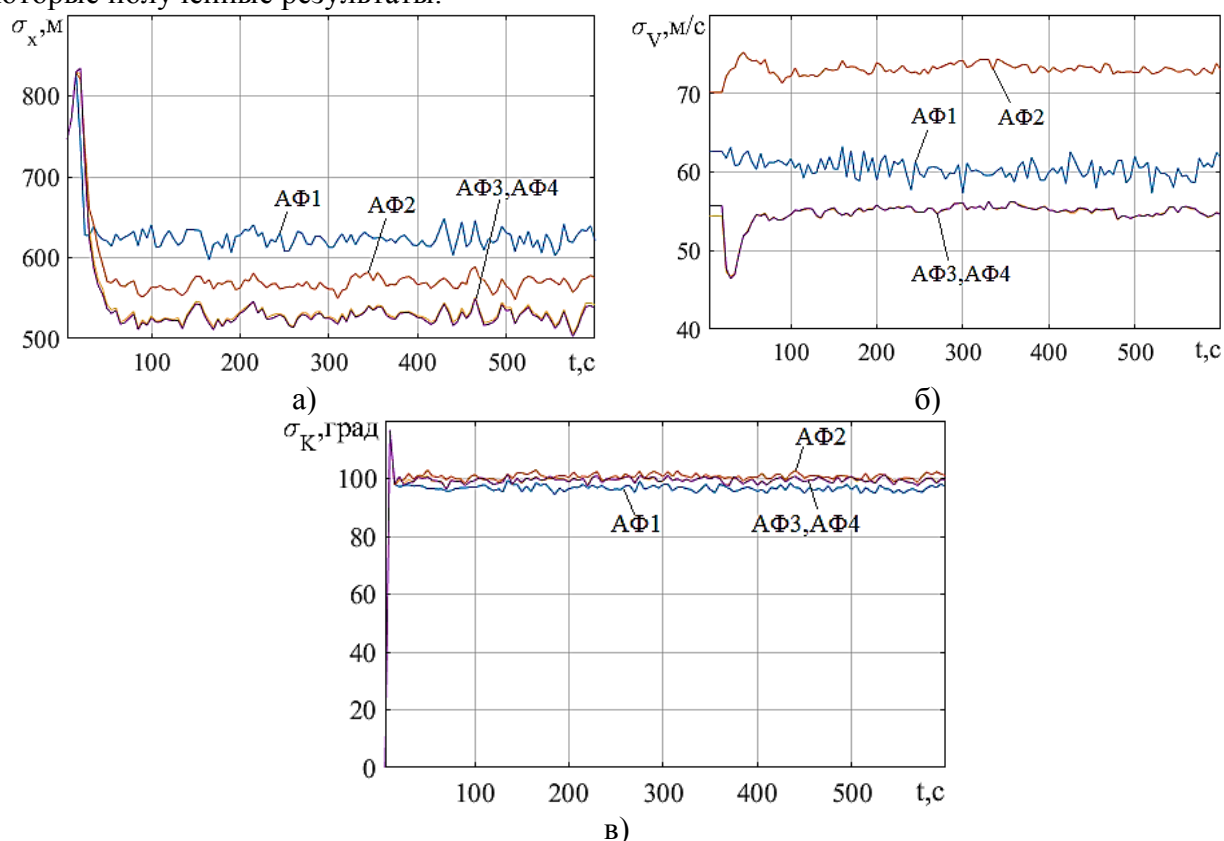


Рисунок 16 – Погрешности оценивания координаты x (а), скорости (б) и курса (в)

На рисунке 16 представлены результаты для целей, движущихся с сильным маневрированием по курсу при малой скорости ($V=100\text{ м/с}$, $a=0\text{ м/с}^2$, $v_k=20\text{ град/с}$). Хорошо видно, что фильтры в связанных координатах имеют преимущество в точности оценивания координат (рисунок 16а). АФ3 и АФ4 имеют наибольший выигрыш относительно

АФ1 – около 20%. АФ2 имеет выигрыш около 10%. При оценивании скорости (рисунок 16б) АФ3 и АФ4 обеспечивают приблизительно на 10% более точное оценивание по сравнению с АФ1, АФ2, напротив, уступает АФ1 около 20%. При оценивании курса (рисунок 16в) все фильтры имеют близкую точность с некоторым преимуществом АФ1 относительно фильтров в связанных координатах.

На рисунке 17 представлены результаты для целей, движущихся с ускорением и маневрированием на высокой скорости ($V=900$ м/с, $a=5$ м/с², $v_k=3$ град/с). При таких начальных условиях АФ4 имеет точность оценивания координат на уровне АФ1, АФ3 проигрывает около 15%, точность АФ2 зависит от удаления цели от РЛС (рисунок 17а). Так, на удалениях менее 100 км выигрыш АФ2 достигает 5%, однако на удалениях, превышающих 100 км, точность АФ2 снижается и проигрыш составляет около 25%. Однако при оценивании скорости (рисунок 17б) АФ2 имеет наименьшее значение погрешности и выигрывает относительно АФ1 независимо от удаления цели. Значение выигрыша при этом превышает 15%. АФ3 и АФ4 проигрывают АФ1 30% и 15% соответственно. При оценивании курса (рисунок 17в) все алгоритмы имеют близкое значение погрешности, однако на больших удалениях цели от РЛС АФ2 имеет худшую точность оценивания курса.

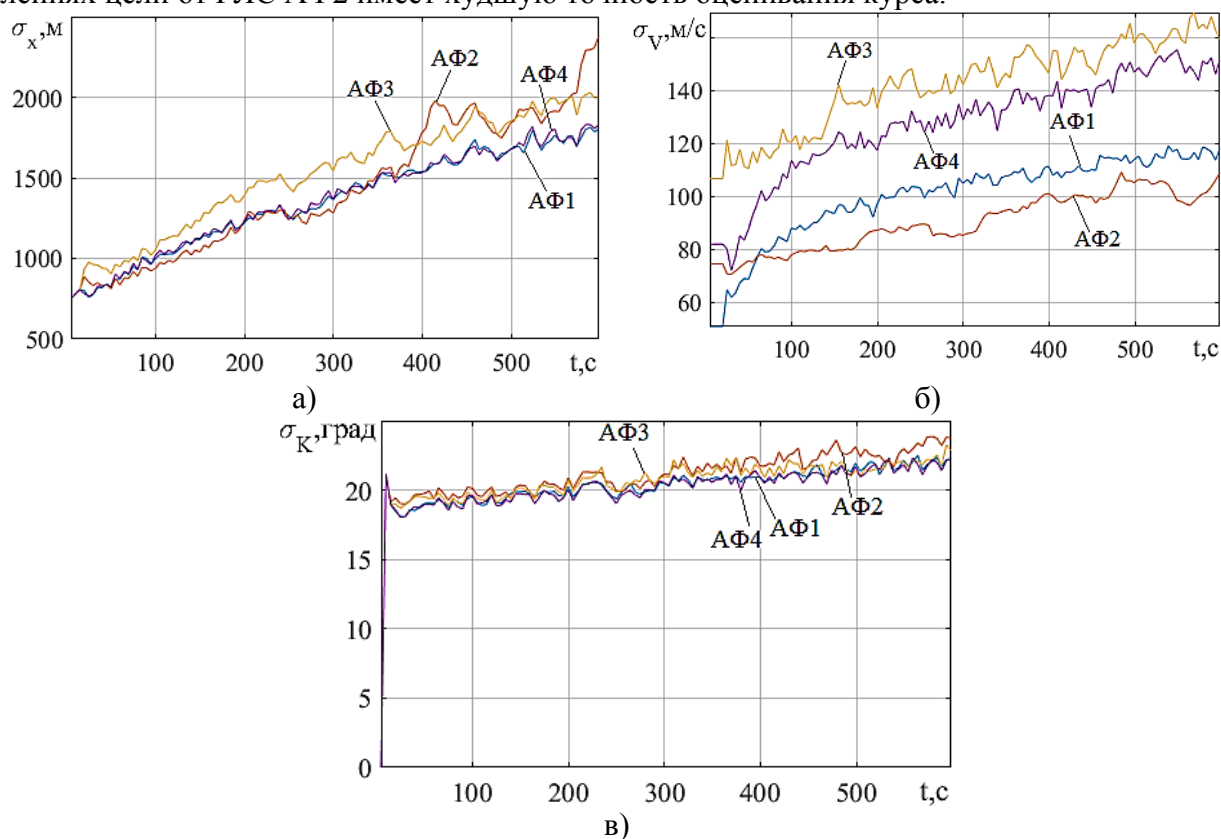


Рисунок 17 – Погрешности оценивания координаты x (а), скорости (б) и курса (в)

Основные результаты и выводы

1. Для описания движения маневрирующих целей предложены новые модели движения в связанной с направлением движения цели системе координат. Установлено, что разработанные модели позволяют имитировать траектории близкие к реальным, причем основные параметры моделей определяются только типом цели и не связаны с координатными осями, используемыми при сопровождении.

2. На основе предложенных моделей движения синтезированы алгоритмы траекторной фильтрации, один из которых основан на модели с включенными в вектор состояния связанными координатами, а два других – на квазилинеаризованной модели. За счет введения

оценок связанных координат обеспечивается подстройка фильтров к изменению характера движения сопровождаемого объекта. Отличительной особенностью одного из алгоритмов является возможность выполнения отдельного по координатам оценивания траекторных параметров. Такое решение, сохраняя преимущества фильтрации в связанных координатах, обеспечивает снижение вычислительной нагрузки и может быть более предпочтительным в условиях ограниченной производительности системы траекторной обработки.

3. Проведенный сравнительный анализ показал, что алгоритмы фильтрации в связанных координатах обеспечивают более точное оценивание как координат, так и скорости по сравнению с линейным ФК. При определенных условиях фильтры в связанных координатах выигрывают до 40% в точности оценивания координат и до 90% в точности оценивания скорости. По результатам всех исследований наиболее предпочтительными выглядят АФ2 и АФ4. При этом АФ2 обеспечивает наибольший выигрыш в условиях помех, в том числе при сопровождении высокоскоростных маневрирующих целей (до 20% в точности оценивания координат и до 15% при оценивании скорости).

4. Для алгоритмов траекторной фильтрации в связанных координатах предложено формирование строга в форме усеченного эллипсоидного сектора, что обеспечивает для скоростных и высокоманевренных целей до 30% более продолжительное сопровождение цели, чем при эллиптическом стробировании. Такой результат объясняется способностью секторного строга к адаптации размеров в зависимости от интенсивности маневрирования сопровождаемой цели. Полученные форма и размеры строга соответствуют области наиболее вероятного местоположения цели в следующий момент времени наблюдения.

5. Проведенный сравнительный анализ при имитации сопровождения цели в сферических координатах показал, что алгоритмы в связанных координатах обеспечивают снижение погрешностей оценивания траекторных параметров по сравнению с линейным ФК. В отдельных случаях фильтры в связанных координатах выигрывают до 40% в точности оценивания координат, более 95% в точности оценивания скорости и более 80% в точности оценивания курса.

6. В ходе моделирования сопровождения быстро маневрирующих целей в сферических координатах установлено, что для высокоскоростных маневрирующих целей АФ2 имеет наименьшее значение погрешности при оценивании скорости и выигрывает относительно АФ1 более 15%, но АФ3 и АФ4 проигрывают АФ1 30% и 15% соответственно. Однако для целей, движущихся с сильным маневрированием по курсу на малых скоростях, АФ3 и АФ4 обеспечивают приблизительно на 10% более точное оценивание по сравнению с АФ1.

7. Разработан программный комплекс для имитации движения целей с различным маневрированием и исследования эффективности предложенных алгоритмов траекторной фильтрации и стробирования при наблюдениях в декартовых и сферических координатах. При создании программ использованы технические решения, обеспечивающие переносимость и кроссплатформенность полученных программ. Все предложенные алгоритмы реализованы в виде автономных модулей и могут быть использованы в существующих системах траекторной обработки, разработанных на языке С++. Благодаря своей структуре ПК может быть легко дополнен другими программными модулями.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Васильев К.К., Лучков Н.В., Саверкин О.В. Сравнительный анализ алгоритмов траекторной фильтрации // Радиотехника. – 2017. – №6. – С. 27-31.

2. Васильев К.К., Саверкин О.В. Фильтрация траекторных параметров в связанных координатах // Радиотехника. – 2019. – №9(14). – С. 56-62.

3. Васильев К.К., Маттис А.В., Саверкин О.В. Стробирование радиолокационных отметок при траекторной фильтрации в связанных координатах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. –2019. – №22(5). – С.71-79.

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

4. Пат. RU 2679598 G 01 S 13/66 (2006.01). Способ адаптивного сопровождения радиолокационных целей и устройство для его реализации / Маттис А.В., Васильев К.К., Саверкин О.В., Корсунский А.С.; опубл. 12.02.2019. Бюл №5.

5. Пат. RU 2707581 G 01 S 13/58 (2006.01). Способ адаптивного сопровождения целей с формированием строга в связанной с целью системе координат / Маттис А.В., Васильев К.К., Саверкин О.В., Шлыков Д.И.; опубл. 28.11.2019. Бюл №34.

6. Свид. 2019617911 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Моделирование и сравнительный анализ алгоритмов траекторной фильтрации и стробирования. / О.В. Саверкин, Д.И. Шлыков, К.К. Васильев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО УлГТУ (RU). – №2019617911; заявл. 05.06.2019; опубл. 24.06.2019, Реестр программ для ЭВМ. - 1 с.

Публикации в других изданиях

7. Саверкин О.В. К вопросу о совместной обработке радиолокационной информации // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сб. научных трудов 9-й всероссийской науч.-практ. конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 39-41.

8. Саверкин О.В. О некоторых принципах совместной обработки данных от нескольких радиолокационных станций // Интегрированные системы управления. - Ульяновск: ФНПЦ АО "НПО "Марс", 2016. – С. 182-187.

9. Саверкин О.В., Лучков Н.В. О некоторых принципах оценивания траекторных параметров // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сб. научных трудов 10-й всероссийской науч.-практ. конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 58-61.

10. Саверкин О.В. К вопросу о применении линейного фильтра Калмана при траекторной обработке радиолокационной информации // Тезисы 59-й научной конференции МФТИ. URL: <http://conf59.mipt.ru/static/prog.html> (дата обращения: 04.10.19).

11. Саверкин О.В. Анализ алгоритмов траекторной фильтрации // «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2017)». – Тольятти: Поволжский государственный университет сервиса, 2017. – С. 439-444.

12. Саверкин О.В. Сравнительное моделирование алгоритмов траекторной обработки // «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем». – М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. – С. 347-353.

13. Саверкин О.В. Сравнительное моделирование алгоритмов траекторной фильтрации // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сб. научных трудов 10-й всероссийской науч.-практ. конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С.58-61.

14. Saverkin O.V., Comparative analysis of digital radar data processing algorithms. CEUR Workshop Proceedings, "REIT 2 2017 - Proceedings of the 2nd International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies", 2005, pp. 120–126 (2017).

15. Саверкин О.В. Сравнительное моделирование алгоритмов траекторной фильтрации // Сборник докладов 20-й Международной конф. DSPA-2018. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2019. – С. 93-97.

16. Саверкин О.В. Эффективность траекторной фильтрации в связанных координатах // Сборник докладов 73-й Международной конф. REDS-2018. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018. – С. 42-45.

17. Васильев К.К., Маттис А.В., Саверкин О.В. Алгоритмы траекторной фильтрации в связанных координатах // 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. – С. 54-55.

18. Саверкин О.В. Алгоритмы траекторной фильтрации // 73-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио. - СПб.: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. - С. 55-57.

19. Саверкин О.В. Об эффективности траекторной фильтрации в связанных координатах // Автоматизация процессов управления. – 2018. – №3(53). – С. 90-94.

20. Саверкин О.В. Оценивание траекторных параметров в связанных координатах // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сб. научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – С.87-91.

21. Саверкин О.В., Лучков Н.В. Исследование эффективности алгоритмов траекторной фильтрации // Современное состояние и перспективы развития специальных систем радиосвязи и радиоуправления: Сб. трудов конф. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2018. – С. 192-197.

22. Маттис А.В., Саверкин О.В. Эффективность траекторной фильтрации в связанных координатах // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – №11. – С. 19-24.

23. Васильев К.К., Саверкин О.В. Сравнительная оценка алгоритмов траекторной фильтрации // Сборник докладов 21-й Международной конф. DSPA-2019. М.: РНТОРЭС им.А.С. Попова, 2019. - С.343-347.

24. Саверкин О.В. Сравнительный анализ алгоритмов траекторного стробирования // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сб. научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С.51-55.

25. Васильев К.К., Саверкин О.В. Анализ эффективности алгоритмов траекторной фильтрации в связанных координатах // Сборник докладов 2-й Всероссийской конф. СТОС-2019. М.: РНТОРЭС им.А.С. Попова, 2019. - С.164-169.

26. Васильев К.К., Саверкин О.В., Маттис А.В. Стробирование при траекторной фильтрации в связанных координатах // XIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. - М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2019. - С. 161-165.

27. Vasiliev K.K., Saverkin O.V. Comparative Evaluation of Algorithms for Trajectory Filtering. In: Favorskaya M., Jain L. (eds) Computer Vision in Control Systems-6. Intelligent Systems Reference Library, vol 182, 2020. Springer, Cham.